

НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОНОСИТЕЛИ

УДК 621.382.049.77

Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕГАТРОННЫХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТУННЕЛЬНЫХ МДМ-НАНОСТРУКТУР

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сверхтонкая диэлектрическая пленка МДМ-наноструктуры (металл–диэлектрик–металл), подвергнутая сильным внешним воздействиям (большие электрические и магнитные поля, высокий уровень токовой инжекции, значительная интенсивность оптического возбуждения) обнаруживает существенно нелинейное поведение: наблюдаются значительные отклонения от линейного (омического) соотношения между током и напряжением. При определенных условиях возникают неустойчивости такого типа как скачки и колебания тока и/или напряжения, переключение и гистерезис в вольт-амперной характеристике. В сенсорных микро-наносистемах указанные неустойчивости могут быть специально получены и использованы для контроля параметров различных физических параметров. Одной из таких неустойчивостей в туннельных сенсорных МДМ-наноструктурах является генерация электрических колебаний в супервысокочастотном диапазоне (от десятков гигагерц до десятков терагерц). По изменению параметров возбуждаемых колебаний судят о характере и величине внешнего воздействия на сенсорную МДМ-наносистему.

Туннельная МДМ-наноструктура как чувствительный элемент негatronной сенсорной системы

Одно из замечательных свойств туннельных МДМ-наноструктур — возможность получения на вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Наличие такой характеристики позволяет создавать негatronные сенсорные системы с чувствительными элементами в виде туннельных МДМ-наноструктур. В данном случае сенсорные свойства негatronного элемента заключаются в том, что

МДМ-наноструктура включается в режим генерации электрических колебаний, частота которых изменяется под воздействием внешних факторов. Достоинством таких систем контроля является возможность использования их в составе сенсорных сетей с передачей данных по радиоканалу.

Вольт-амперная характеристика МДМ-наноструктуры, измеряемая в стационарных условиях, зависит как от микроскопических свойств туннельно тонкого диэлектрического слоя МДМ-наноструктуры, так и от параметров металлических проводников электрической схемы. Дело в том, что величина тока через МДМ-наноструктуру определяется параметрами всей электрической цепи, в которую включена МДМ-наноструктура. Электрическая цепь в данном случае рассматривается как сложное соединение активных и реактивных элементов, таких как сопротивления, индуктивности и емкости металлических проводников и контактов между ними.

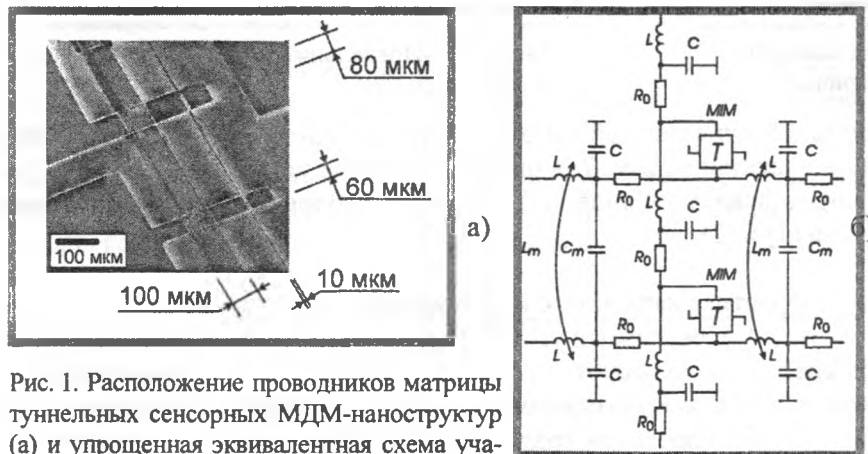


Рис. 1. Расположение проводников матрицы туннельных сенсорных МДМ-наноструктур (а) и упрощенная эквивалентная схема участка ее топологии (б).

В свою очередь, микроскопические свойства туннельнотонкого диэлектрика определяют зависимость плотности тока через МДМ-наноструктуру от величины приложенного к ней электрического поля. Если эта зависимость имеет область отрицательной дифференциальной проводимости, то есть если плотность тока уменьшается с ростом электрического поля или, наоборот, возрастает при уменьшении поля, то соответствующие стационарные состояния в общем случае неустойчивы. Данные соображения взяты за основу при определении подходов к вопросу аналитического моделирования негatronных сенсорных элементов, чувствительными элементами которых являются туннельные МДМ-наноструктуры с отрицательной дифференциальной проводимостью [1].

К созданию отрицательной дифференциальной проводимости приводят следующие техно-



Рис.2. Фазовая диаграмма и колебания тока и напряжения в электронной системе, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру ($R_0/Z_0 = 3$).

логические приемы формирования МДМ-наноструктур и основные микроскопические механизмы, реализуемые в данных наноструктурах. Образование *N*-образной вольт-амперной характеристики происходит при ее электроформовке, а *S*-образная зависимость типична для случая электрического пробоя структуры с тепловой неустойчивостью. Эффект электрического переключения проводимости с памятью наблюдается также в МДМ-наноструктурах при использовании в качестве туннельнотонких диэлектриков соединений редкоземельных элементов, в частности, редкоземельных фторидов. Кроме того, переключение проводимости структуры возможно при фазовом переходе проводник-изолятор в оксидах переходных металлов в результате повышения температуры или давления.

Типичное для матрицы туннельных сенсорных МДМ-наноструктур расположение проводников представлено на рис. 1а [2, 3]. Каждый проводник внешней электрической цепи характеризуется распределенными значениями сопротивления, индуктивности и емкости. Взаимно перпендикулярные проводники в области пересечения образуют МДМ-наноструктуры, а между параллельными проводниками существуют емкостные и индуктивные связи. С учетом этого на рис. 1б показана упрощенная эквивалентная схема фрагмента топологии внешней электрической цепи туннельной МДМ-наноструктуры. Здесь R_0 , L — распределенные значения сопротивления и индуктивности проводника, C — распределенная емкость проводника относительно заземленных элементов конструкции; C_m , L_m — распределенные значения емкости связи и взаимной индуктивности между проводниками.

Сопротивление проводников внешней цепи МДМ-наноструктуры зависит от сопротивления R_Σ и длины l_Σ каждого отдельного участка общей конфигурации проводников:

$$R_0 = \Sigma R / \Sigma l. \quad (1)$$

где $R = R_S n$; $R_S = \square / d$; $n = l / b$; l , b , d — длина, ширина, толщина проводника соответственно; \square — удельное сопротивление материала проводника. Поскольку в области изгиба проводника плотность тока не остается постоянной, учитывается число квадратов, связанных с участками изгибов или других геометрических отклонений от прямолинейности, а также определяется их вклад в общую величину сопротивления. При этом сохраняется обычный расчет для прямолинейных участков и устанавливается сопротивление, вносимое квадратом на участке изгиба как часть сопротивления квадрата на прямолинейном участке.

Величина индуктивности проводников является функцией геометрии и магнитной проницаемости материала подложки и тонких пленок. При условии, что в конструкции МДМ-наноструктуры не применяются магнитные материалы, величина индуктивности проводников зависит только от их размеров. Предполагается также, что толщина пленочных проводников значительно меньше их ширины. В этом случае индуктивность одиночного прямолинейного тонкопленочного проводника на единицу длины определяется выражением:

$$L = \mu_0 / 2\pi \cdot [\ln(2l/b) + 1/2 + b/3l], \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; l , b — длина и ширина проводника соответственно; $b \ll l$.

При расчете распределенной емкости проводников предполагается, что подложка простирается достаточно далеко по обе стороны от них, а длина проводников достаточно велика по сравнению с шириной и расстоянием между ними. Толщина пленочных проводников пренебрежимо мала по сравнению со всеми остальными размерами. Емкость на единицу длины двух параллельных проводников определяется выражением:

$$C = \epsilon_0 \epsilon c / 2, \quad (3)$$

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\epsilon \gg 1$ — диэлектрическая проницаемость материала подложки; $c = K'/K$, $K(k)$ — полный эллиптический интеграл I типа, являющийся табулированной функцией; $k = \text{th}(\pi a/4d)/\text{th}[\pi(a+2b)/4d]$; $k' = (1 - k^2)^{1/2}$; l, b, a, d — длина и ширина проводников, расстояние между ними и толщина подложки, соответственно.

Параметры колебаний негатронной сенсорной системы на основе туннельной МДМ-наноструктуры

Выражение для автоколебаний в электрической схеме, содержащей элемент с отрицательной дифференциальной проводимостью, например туннельную МДМ-наноструктуру, можно представить в виде:

$$U_0/R = d^2 I_C / dt^2 + \{1 - [U_C(I_C)/I_C R]\} I_C + (1/Z_0)[dU_C(I_C)/dI_C + Z_0/R](dI_C/dt) \quad (4)$$

где U_0 — напряжение внешнего источника; R — сопротивление всей электрической цепи; I_C и U_C — ток через МДМ-наноструктуру и напряжение на ней; $Z_0 = (L_0/C_0)^{1/2}$ [4].

Оценка распределенных значений R, L и C проводников проводилась для наиболее характерных размеров: длина проводников 1–10 мм; ширина 0,01–0,1 мм; толщина 0,2–1,0 мкм; толщина подложки 0,2–0,5 мм. Генерация колебаний возникает при отношении R_0/Z_0 , лежащем в диапазоне 3–12; здесь $R_0 = R$ при $I_C = 0$.

Выражение для автоколебаний (4) является уравнением Ван-дер-Поля, которое при определенных начальных параметрах дает замкнутую фазовую траекторию (рис. 2). При малых R_0/Z_0 затухание вносит малое возмущение и решения типа предельного цикла для $U_C(t)$ и $I_C(t)$ почти синусоидальны, с ростом R_0/Z_0 характеристики становятся более пилообразны, а решения, не входящие в рассматриваемый диапазон R_0/Z_0 описывают затухающие колебания.

Результаты расчета показывают, что частота колебаний резко снижается с ростом значений R_0/Z_0 (рис. 3). Так, увеличение R_0/Z_0 с 3 до 12 приводит к снижению частоты колебаний с 20–30 ГГц до 1–3 ГГц.

Таким образом, можно сделать вывод, что частота колебаний достаточно чувствительна к изменению параметров электрической цепи, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру. Измеряя указанную частоту, можно судить о параметрах МДМ-наносистемы и, следовательно, выполнять контроль внешнего воздействия с использованием туннельных МДМ-наносенсоров.

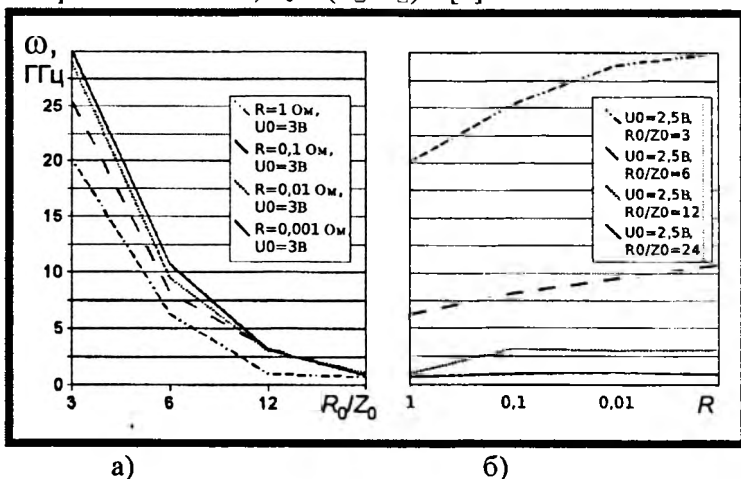


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний от параметров электронной системы, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру: а — от R_0/Z_0 ; б — от R .

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования // Нано- и микросистемная техника. — № 9. — 2007. — С. 46–52.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Теоретическая и прикладная механика. — Вып. 22. — 2007. — С. 287–296.
3. Гулай В. А. Электрофизические свойства туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Электроника-инфо. — № 9. — 2007. — С. 52–56.
4. Shaw M. P., Gastman I. J. Circuit Controlled Current Instabilities in “S-Shaped” Negative Differential Conductivity Elements // Appl. Phys. Lett. — 1971. — Vol. 19, N 7. — P. 243–245.